

Rauchausbreitung in Passagen

– Hinweise zur Bemessung von Rauchabzügen auf der Grundlage englischer Forschungsergebnisse –

C. Kunze

1. Problematik der Passagen im Brandfall

Entwurf eines Szenarios

Als Passage bezeichnet man einen zwischen belebten Straßen hindurchgeführten, glasüberdachten Verbindungsgang, der auf beiden Seiten gesäumt ist von einzelnen Läden. In den oberen Geschossen können Läden, Büros, Werkstätten oder auch Wohnungen untergebracht sein. Die Passage im hier behandelten Zusammenhang ist eine Organisationsform des Detailhandels. Sie ist das Angebot öffentlichen Raumes auf privatem Gelände und bietet Verkehrserleichterung, Abkürzung, Schutz vor der Witterung und nur dem Fußgänger zugängliche Flächen [1].

Von Passagen kann im Brandfall ein besonderes Risiko ausgehen, und zwar zum einen für Personen, zum anderen für das Gebäude und dessen Inhaltswerte. Berichte von spektakulären Passagenbränden sprechen von mehrstelligen Millionenbeträgen [2], [3], [4], Abb. 1 und 2 Seite 27.

In den meisten Fällen entwickelte sich ein Brand in einer von der Passage getrennten Nutzungseinheit. Wenig später wurde die Verglasung zur Passage an der Verkaufsfond zerstört. Flammen und Rauch gelangten in die Passage. Zwar wurden Versuche unternommen, den Raumabschluss auch im Brandfall durch erhöhten Sprinklerschutz sicherzustellen [5] und damit den Rauch auf den Bereich der brennenden Nutzungseinheit zu begrenzen, jedoch zeigten diese Maßnahmen wenig Erfolg, da in den meisten Fällen die Verglasung zerstört wurde.

Während die Flammen zuerst nur die dem Brandort gegenüberliegenden Nutzungseinheiten bedrohen, breitet sich der Rauch sehr schnell innerhalb der Passage aus. Dabei wird der 1. Rettungsweg verlegt und die im gesamten Komplex befindlichen Personen werden gefährdet. Die Rettungsweglänge überschreitet 35 m. Die Benutzer müssen sich über eine längere (verqualmte) Strecke einen Weg ins Freie suchen.

Durch die Brand- und Rauchausbreitung sind außerdem erhebliche Sachwerte gefährdet. Die Erfahrung zeigt, daß gerade durch die horizontale Rauchausbreitung weit mehr Nutzungseinheiten in Mitleidenschaft gezogen werden, als dies bei einer konventionellen Bauweise der Fall ist. Sofern der Rauch nicht abgeführt werden kann, verteilt er sich großflächig im Gebäude und verursacht beträchtliche Schäden am Inhalt des Gebäudes.

Der vorstehend skizzierte Vorgang der Brandausbreitung wurde im Hinblick auf den erforderlichen Mindestabstand gegenüberliegender Fensteröffnungen bereits untersucht [6]. Der vorliegende Artikel befaßt sich daher nur mit den Vorgängen bei der Rauchausbreitung. Die folgenden Ausführungen beruhen im wesentlichen auf englischen Modellversuchen, die in einem Bericht des „Building Research Establishment“ zusammengefaßt wurden [7].

Die Erfahrungen bei Bränden im Bereich von Passagen zeigen folgendes Ausbreitungsverhalten des Rauches:

Der Rauch verläßt die brennende Nutzungseinheit durch die zerstörte Verglasung und steigt in Richtung des oberen Abschlusses der Passage auf. Dabei vermischt sich der Rauch mit der von den Seiten zuströmenden Umgebungsluft und

kühlt gleichzeitig ab. Sind keine geeigneten Maßnahmen zur Verhinderung der Rauchausbreitung getroffen worden, breitet sich der Rauch entlang der Passage aus (Abb. 3 a Seite 27), wobei Ausbreitungsgeschwindigkeiten zwischen 1–2 m/s erreicht werden können. Während dieser horizontalen Ausbreitungsphase vergrößert sich der Rauchgasmassenstrom dann aber nicht weiter.

Erreicht der Rauch ein geschlossenes Ende der Passage, wird er umgelenkt und am Boden in Richtung auf den Ursprungsort zurückgeführt (Abb. 3 b Seite 27). Die fliehenden Personen werden in dieser Situation besonders gefährdet. Aber auch wenn die Passage offen ist, kann es zu kritischen Momenten kommen. Besonders wenn Wind auf die Öffnung steht, besteht die Gefahr einer Vermischung von Rauch und einströmender Frischluft, und die Situation ist trotz der teilweisen Rauchabführung ähnlich kritisch (Abb. 3 c Seite 27).

Da es allgemein nicht möglich sein wird, den Rauch am Eindringen in die Passage zu hindern, beschäftigen sich die englischen Untersuchungen ausschließlich damit, den Rauch innerhalb der Passage so zu beherrschen, daß dessen kontrollierte Abführung gewährleistet ist.

2. Grundlagen der kontrollierten Rauchausbreitung

Die wesentliche Voraussetzung der englischen Untersuchung ist die Begrenzung des Brandes durch eine Sprinkleranlage. So läßt sich eine Brandfläche von 3 m x 3 m definieren und ein maximaler Energieumsatz von 5 MW am Brandort festlegen. Damit wird ebenfalls der vom Brandort ausgehende Rauchgasmassenstrom begrenzt.

Das bekannte Prinzip der Rauchabzüge, nach dem innerhalb des Gebäudes aufgrund des von der Brandstelle ausgehenden Wärmestromes Bereiche mit Unter- bzw. Überdruck entstehen, gilt auch für Passagen. Im Bereich des Überdrucks sammelt sich der Rauch und strömt dann, durch den Überdruck getrieben, aus den Rauchabzügen ab.

Zusätzlich werden die Überdruckbereiche durch Schürzen (Abb. 4 a) oder durch eine entsprechende bauliche Ausbildung der Passage abgegrenzt (Abb. 4 b, 4 c, 4 d) und es entstehen Rauchreservoirs.

Durch die so kontrollierte Rauchabführung wird der Rauch daran gehindert, sich horizontal im gesamten Passagenbereich auszubreiten.

Allgemein kann davon ausgegangen werden, daß Rauchabführung aus Passagen mit vergrößertem Querschnitt – wie in Abb. 4 c, d dargestellt –, einen höheren Wirkungsgrad hat, als dies bei schmalen, engen Passagen der Fall ist. Dabei muß jedoch bedacht werden, daß sich der abzuführende Rauchgasmassenstrom in dem Maß vergrößert, wie die Rauchuntergrenze ansteigt, da der Rauch bis zum Eintritt in die Rauchschicht einen längeren Weg zurücklegt und eine entsprechend größere Verdünnung mit Umgebungsluft erfolgt (Abb. 5).

Durch die Höhenabhängigkeit des abzuführenden Rauchgasmassenstromes wird gleichzeitig deutlich, daß die Angabe einer Mindestfläche oder eines Mindestmassenstromes für Rauchabzüge als Funktion der Passagenrundfläche zu falschen Ergebnissen führen muß.

Aus dem Rauchreservoir kann der Rauch abströmen oder abgesaugt werden. Dabei ist besonders zu beachten, daß am Boden der Passage ausreichend Frischluft nachgeführt wird, ohne daß diese sich bereits vor dem Brandort mit dem Rauch vermischen kann (Abb. 6). Rauchabzüge und Nachstromöffnungen für Umgebungsluft sollten dabei möglichst gleichmäßig so verteilt werden, daß sich eine kontinuierliche Strömung durch die Passage einstellt, denn in Bereichen von Stagnation wird sich Rauch ansammeln und mit der darunter befindlichen klaren Luft vermischen.

Ein weiteres Durchmischungsproblem entsteht, wenn die Frischluft durch eine enge Öffnung mit hoher Geschwindigkeit in die Passage einströmt und dann direkt unter einer Rauchschicht entlanggeführt wird. Um die Gefahr einer Vermischung von Rauch und Frischluft zu vermindern, wird in diesem Fall empfohlen, den Rauch mit einer Schürze mindestens 3 m von der Öffnung fernzuhalten. So wird gewährleistet, daß sich die Geschwindigkeit der Frischluft – bevor sie mit dem Rauch in Berührung kommt – soweit reduziert hat,

daß es nicht mehr zu Verwirbelungen kommen kann (Abb. 6).

Nur wenn die Entrauchung so ausgelegt ist, daß die Untergrenze der Rauchschicht mindestens 2 m über der Oberkante der Lufteintrittsöffnung liegt, ist eine Verwirbelung nicht zu erwarten.

Die Größe und die Zahl der Nachströmöffnungen sollte so bemessen sein, daß die Strömungsgeschwindigkeit der Luft geringer als 3 m/s ist, insbesondere dann, wenn die Eintrittsöffnung gleichzeitig die Aufgabe des Fluchtweges übernimmt.

Falls dann jedoch Schwierigkeiten mit der Öffnungsgröße entstehen, wird empfohlen, Rauchabzüge in Bereichen, die nicht mit Brandrauch beaufschlagt sind, mit zu öffnen, um dort den Lufteintritt zu gewährleisten. Es wird weiterhin empfohlen, daß die Grundfläche eines solchen Rauchabschnittes 1000 m² bei natürlichem, 1300 m² bei maschinellem Rauchabzug nicht übersteigen sollte. Dies wird damit begründet, daß ansonsten dem Rauch-Luft-Gemisch durch Wärmeübergang an Decken und Wänden sowie durch Strahlung soviel Energie entzogen wird, daß es in Bodennähe zurückfällt und die Benutzer der Passage gefährdet. Aus dem gleichen Grund sollte die Länge des Rauchreservoirs auf 60 m begrenzt werden.

3. Bemessungsgrundsätze für Rauchabzüge in Passagen

3.1 eingeschossige Passagen

Wie bereits festgestellt, vergrößert sich der Rauchgasmassenstrom vom Brand bis zum Eintritt in die Rauchschicht im Bereich des oberen Passagenabschlusses durch eine Verdünnung mit Umgebungsluft. Zusätzlich sind Verwirbelungseffekte beim Einströmen des Rauches von der Nutzungseinheit in die Passage zu berücksichtigen (Abb. 7 Seite 29), die zu einer weiteren Vergrößerung des Massenstromes führen.

Für den aus der Passage abzuführenden Massenstrom gilt folgende empirisch ermittelte Beziehung:

$$M = 0,4 \cdot P \cdot y^{3/2}$$

mit

M = Rauchgasmassenstrom beim Eintritt in die Rauchschicht (kg/s)

P = Umfang der Brandfläche (m)

y = Abstand zwischen Brandort und Rauchuntergrenze (m)

Der Wert für die Höhe y ergibt sich aus der Überlegung, daß die Rauchuntergrenze so weit wie möglich über den Köpfen der fliehenden Personen liegen und der Brandrauch auf das obere Drittel der Passagen beschränkt werden sollte [5], damit Panikreaktionen der fliehenden Personen ausgeschlossen werden. Eine Höhe von 2,5 m ist als absolutes Minimum

ohne zusätzlichen Sicherheitsfaktor anzusehen.

In Tabelle 1 wird für die in gesprinkelten Bereichen angenommene Brandfläche von 3 m x 3 m in Abhängigkeit von der Aufstiegshöhe y der Rauchgasmassenstrom ermittelt. Aus Versuchen werden dann die Temperaturen der Rauchgase beim Eintritt in die Rauchschicht ebenfalls in Abhängigkeit von y zusammengestellt.

Tabelle 1. Ermittlung der Vergrößerung des Massenstromes M in Abhängigkeit von der Aufstiegshöhe y bei einer Brandfläche von 3 m x 3 m

Höhe der Rauchuntergrenze y (m)	Änderung des Rauchgasmassenstroms Δ M (kg/s)
2,5	20
3	25
3,5	30
4	40
5	55
6	70

Mit diesen Werten kann die Mindestleistung maschineller Rauchabzüge oder die Mindestfläche natürlicher Rauchabzüge ermittelt werden.

Die Berechnung natürlicher Rauchabzüge erfolgt nach der bereits von Thomas et al. früher hergeleiteten Beziehung [8]:

$$M = \frac{c_v \cdot A_v \cdot \rho_1 (2g d_b \cdot \Theta_c \cdot T_1)^{1/2}}{T_c^{1/2} [T_c + (A_v/A_1)^2 \cdot T_1]^{1/2}}$$

mit

M = Massenstrom durch den Rauchabzug (kg/s)

c_v = Strömungsbeiwert (Ausflußzahl) des Rauchabzuges (l)

ρ₁ = Dichte der in das Gebäude einströmenden Umgebungsluft (kg/m³)

g = Erdbeschleunigung (m/s²)

d_b = Dicke der Rauchschicht (m)

Θ_c = Temperaturdifferenz zwischen dem Rauch am oberen Gebäudeabschluß und der Umgebungsluft

T₁ = Temperatur der Umgebungsluft (K)

T_c = Temperatur des Rauches am oberen Gebäudeabschluß (K)

$$T_c = T_1 + \Theta_c (K)$$

A₁ = Fläche der Nachströmöffnungen (m²)

A_v = Fläche des Rauchabzuges (m²)

Für die weitere Rechnung wurden folgende Annahmen getroffen:

$$c_v = 0,6 (l)$$

$$T_1 = 288 K$$

Das Ergebnis dieser Auswertung ist in Tabelle 2 (Seite 29) zusammengefaßt.

Zu den Werten der Tabelle 2 ist anzumerken, daß der Wirkungsgrad der Entrauchung mit kleiner werdenden Nachströmöffnungen sinkt (Abb. 8 Seite 29).

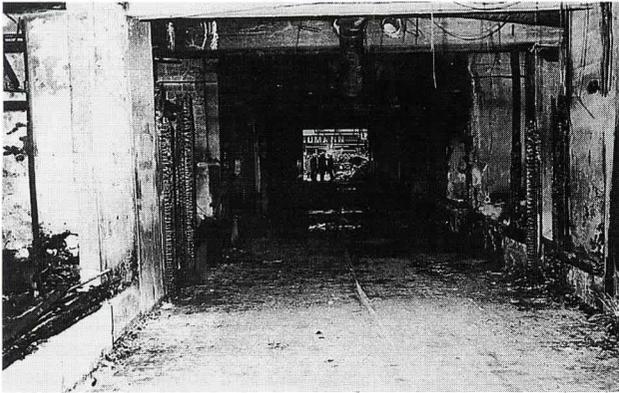


Abb. 1. Brand des Tegel-Centers in Berlin, Brandausbreitung über die Passage. Foto: Berliner Feuerwehr



Abb. 2. Brand des Tegel-Centers in Berlin. Rauch- und Wärmeschäden in einer in großer Entfernung vom Brandort gelegenen Nutzungseinheit. Foto: Berliner Feuerwehr

Abb. 3. Ausbreitung von Rauch in einer Passage ohne Rauchabzüge [5]

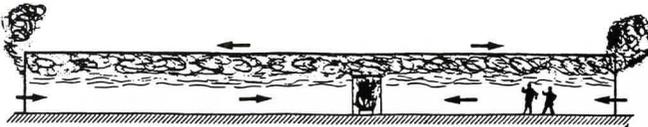


Abb. 3 a. an den Enden der Passage abströmender Rauch



Abb. 3 b. Umlenkung von Rauch an den geschlossenen Enden der Passage

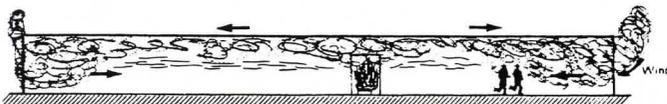


Abb. 3 c. durch den Einfluß von Wind nur teilweise abströmender Rauch

Abb. 4. Möglichkeiten der baulichen Ausbildung von Passagen [7]

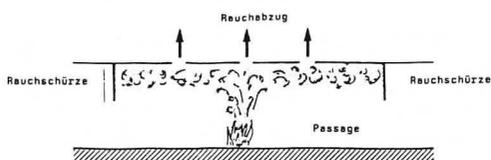


Abb. 4 a. Bildung eines Rauchreservoirs durch Schürzen im Deckenbereich

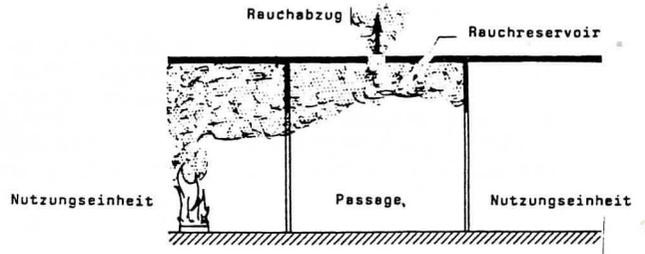


Abb. 4 b. Bildung eines Rauchreservoirs durch Stürze im Deckenbereich

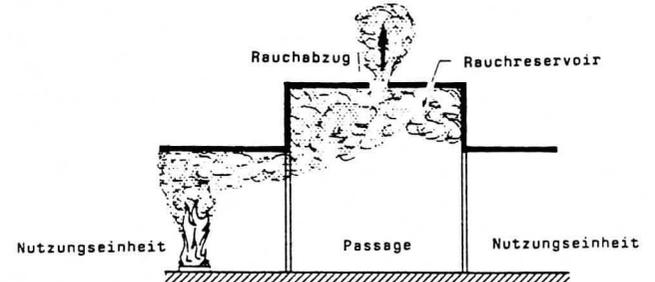


Abb. 4 c. Bildung eines Rauchreservoirs durch vergrößerten Passagenquerschnitt

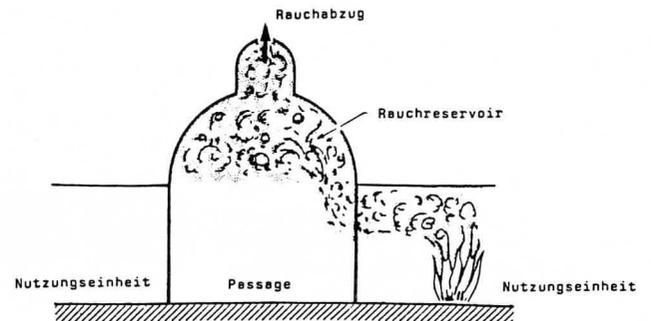


Abb. 4 d. Bildung eines Rauchreservoirs durch vergrößerten Passagenquerschnitt

Abb. 5. Aufnahme von Umgebungsluft in den aufsteigenden Brandrauch [5]

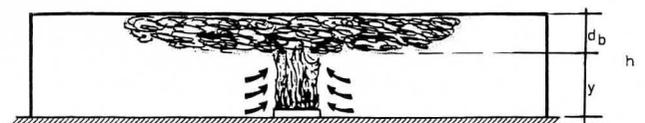
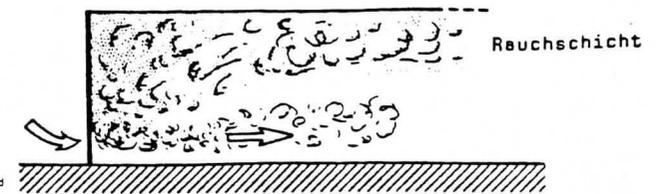
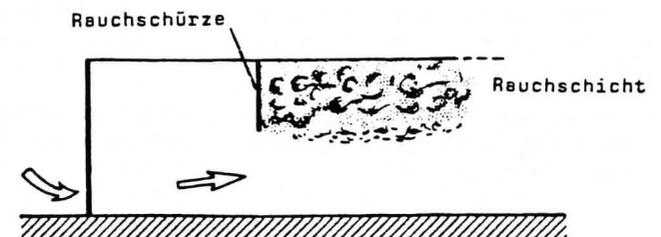


Abb. 6. Problematik der Nachströmöffnungen [7]



Vermischung von Rauch und Frischluft im Bereich der Nachströmöffnung



Reduzierung der Durchmischung im Bereich der Nachströmöffnung durch eine Rauchschürze

Aus diesem Grund ist die Fläche der Rauchabzüge dann wie folgt zu erhöhen:

- Beträgt das Verhältnis der Fläche von Nachströmöffnung zu Rauchabzug 2, ist eine Erhöhung um 10% erforderlich.
- Beträgt das Verhältnis der Fläche von Nachströmöffnung zu Rauchabzug 1, ist eine Erhöhung um 20% erforderlich.

3.2 zweigeschossige Passagen mit Verbindungsöffnungen

Die Beurteilung von mehrgeschossigen Passagen ist wesentlich schwieriger und basiert auf einer Vielzahl von Annahmen. Aus diesem Grund sollen im folgenden nur die zweigeschossigen Passagen behandelt werden.

Für die Unterscheidung dieses Passagentyps wurde angenommen, daß die beiden Geschosse der Passage durch großflächige Öffnungen miteinander in Verbindung stehen (Abb. 9).

Die Auslegungskriterien für den Brand einer im Obergeschoß liegenden Nutzungseinheit entsprechen denen für eingeschossige Passagen, so daß hier nur der Fall des Brandes im Erdgeschoß zusätzlich zu untersuchen ist. In Großbritannien ausgeführte Versuche zeigen, daß sich der Rauch beim Brand einer im Erdgeschoß gelegenen Nutzungseinheit zuerst unterhalb des oberen Abschlusses dieses Geschosses über das gesamte Geschoß ausbreitet. Erst bei größeren Rauchmengen wird dieser sich schlagartig durch die freie Öffnung in das Obergeschoß ausbreiten [9]. Dann jedoch muß mit erheblichen Massenströmen gerechnet werden, zum einen wegen der Verwirbelungseffekte bei der Umlenkung, zum anderen wegen der großflächig aufgenommenen Umgebungsluft. Besonders problematisch ist die aus diesem Vorgang resultierende Abkühlung des Rauchgas-Luft-Gemisches, da damit ein entsprechender Verlust an Auftrieb verbunden ist. Es sollte daher auf jeden Fall vermieden werden, daß der Rauch über mehrere dieser Verbindungsöffnungen abströmen kann. Am besten läßt sich diese Forderung durch entsprechende Rauchschürzen verwirklichen, die an der Decke des unteren Geschosses angebracht werden, wobei die Mindesthöhen 1,5 bis 1,7 m betragen sollten. Weiterhin sollte der Umfang der Öffnungen bei diesem Passagentyp maximal 35 bis 45 m betragen, um auf diese Weise ebenfalls den Zuwachs des Rauchgasmassenstromes zu begrenzen.

In Abb. 9 werden die gerade beschriebenen Vorgänge dargestellt, wobei der Einfluß der Rauchschürzen besonders deutlich wird. Auch im Bereich des Ober-

geschosses sollte Wert darauf gelegt werden, die Rauchausbreitung durch Schürzen einzuschränken.

Da besonders hier als Folge des Aufstieges mit erheblich abgekühltem Rauch gerechnet werden muß, besteht die besondere Gefahr, daß die Rauchbewegung zum Stillstand kommt, der Rauch von der Decke wieder in tiefere Schichten fällt und erneut die Rettungswege gefährdet.

Aus dem gleichen Grund sollte etwa die Hälfte der erforderlichen Umgebungsluft im Bereich des Obergeschosses zugeführt werden. Nur in sehr weiträumigen Passagen ist damit zu rechnen, daß sich eine Luftströmung durch die Verbindungsöffnungen – außerhalb des verqualmten Bereiches – so entwickeln kann, daß es nicht zu Verwirbelungen kommt. Da es zur Zeit keine für diesen speziellen Fall gültige Theorie zur Ermittlung der Verdünnung des Rauchgasmassenstromes während des Aufstiegs gibt, ist man weitgehend auf die Ergebnisse von Modellversuchen angewiesen. Auch hier gilt die Einschränkung, daß die maximale Energiefreisetzung des Brandes 5 MW beträgt. Die Geschoßhöhen wurden mit je 5 m festgelegt. Als Variable verbleiben damit die Schichtdicke des Rauches im Obergeschoß d_b sowie der Umfang der Verbindungsöffnungen. Abb. 10 gibt eine Zusammenstellung der Versuchsergebnisse.

Mit diesen Werten können dann wiederum Mindestleistungen der Rauchabzüge oder Mindestflächen natürlicher Rauchabzüge ermittelt werden. Die Ergebnisse sind der Tabelle 3 zu entnehmen.

Die Werte der Tabelle 3 sind ggf. wie folgt zu erhöhen:

- Beträgt das Verhältnis der Fläche von Nachströmung zu Rauchabzug 2, ist eine Erhöhung um 10% erforderlich.
- Beträgt das Verhältnis der Fläche von Nachströmöffnung zu Rauchabzug 1, ist eine Erhöhung um 20% erforderlich.

Ein Vergleich ein- und zweigeschossiger Passagen macht deutlich, daß sich durch die vergrößerte Höhe der zweigeschossigen Passagen und durch die zusätzlich auftretenden Verwirbelungseffekte eine wesentliche Erhöhung des abzuführenden Rauchgasmassenstromes ergibt.

Weiterhin macht die sich als Folge des Aufstieges ergebende Reduzierung der Temperatur und demzufolge des Überdruckes am oberen Abschluß der Passage eine Vergrößerung der Rauchabzüge erforderlich. Eine Gegenüberstellung der Tabellen 2 und 3 bestätigt diese Feststellung.

3.3 zweigeschossige Passagen mit direkter Verbindung der Geschosse

Die Rauchausbreitung in zweigeschossigen Passagen, bei denen dem Obergeschoß nur ein relativ schmaler Verbindungsweg, vergleichbar einem Laubengang, vorgelagert ist, ansonsten der Passagenquerschnitt nicht eingengt wird (Abb. 11, Schnitt siehe Seite 31 oben links), erfordert zusätzliche Untersuchungen [10], [11].

Brennt eine im Erdgeschoß liegende Nutzungseinheit, wird sich der Rauch zuerst unterhalb des Laubenganges auf einer großen Länge im Erdgeschoß horizontal ausbreiten, jedoch gleichzeitig auf der gesamten Länge über die Vorderkante des Laubenganges in vertikaler Richtung abströmen. So ergibt sich ein Rauchgasstrom, der wegen seiner Länge über erheblich größere Flächen Umgebungsluft aufnehmen kann, als das bei den vorangegangenen Modellen der Fall war. Zusätzlich ist ein erheblich gestiegener Zuwachs des Rauchgasmassenstromes dadurch zu beobachten, daß die Kante, an der die Umlenkung erfolgt, sehr viel länger geworden ist.

Um die horizontale Rauchgasausbreitung unterhalb des Laubenganges einzuschränken, wird hier die Anbringung von Schürzen folgender Abmessungen empfohlen:

Tabelle 4. Mindestabmessung von Schürzen unterhalb der Laubengänge [11]

Abstand der Schürzen (m)	Höhe der Schürzen (m)
4	2,2
6	1,9
8	1,8
10	1,7
14	1,5

Anmerkung: Die Höhe der Schürzen ist von der Unterkante quer zur Ausbreitungsrichtung liegender Hindernisse zu messen.

Auch für diesen Fall wurden Rechenmodelle entwickelt, die die Aufnahme von Umgebungsluft an den Seiten des linear aufsteigenden Rauchgasmassenstromes berücksichtigen. Da jedoch diese Modelle die Vergrößerung tendenziell überbewerten, ist die Aufstiegshöhe y , gemessen ab Unterkante des Obergeschosses, wie folgt zu korrigieren:

$$y = h - 1,26 \cdot d_b$$

mit

y = Aufstiegshöhe des Rauches im Obergeschoß (m)

h = geometrische Höhe des Obergeschosses (m)

d_b = Dicke der Rauchsicht im Obergeschoß (m)

Abb. 7. Aus einer brennenden Nutzungseinheit in die Passage strömender Rauch [7]

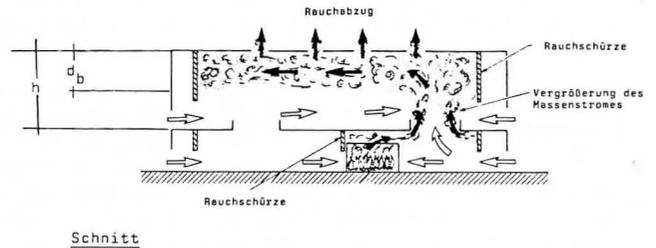
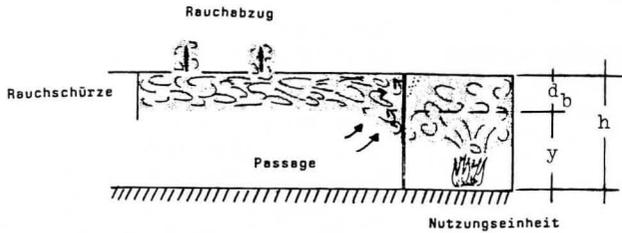


Tabelle 2. Ermittlung der Mindestfläche (m^2) natürlicher Rauchabzüge eines Rauchabschnittes zur Entrauchung einer eingeschossigen Passage

Rauchgasmassenstrom M (kg/s)	Deckentemperatur Θ ($^{\circ}C$)	Schichtdicke d_b (m)				
		1,5	2	3	4	5
20	255	10,0	9,0	7,5	6,5	5,5
25	208	13,0	11,5	9,5	8,0	7,5
30	170	16,0	14,0	11,5	10,0	9,0
40	128	23,0	20,0	16,0	14,0	12,5
55	92	31,0	26,5	22,0	19,0	17,0
70	72	-	40,0	33,0	28,5	25,0

Das Verhältnis der Fläche der Nachströmöffnung zur Fläche der Rauchabzüge muß den Faktor 3 überschreiten.

Abb. 8. Wirkungsgrad des Rauchabzuges in Abhängigkeit von der Nachströmöffnung (vgl. 8)

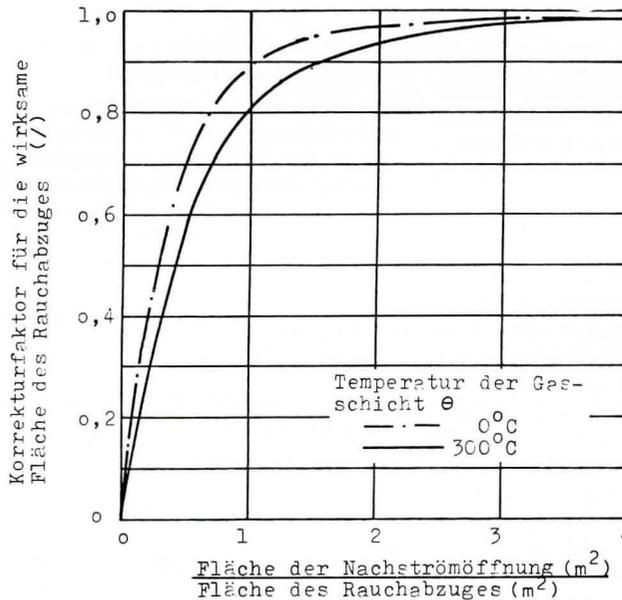


Abb. 10. Abhängigkeit des Rauchgasmassenstromes (M) vom Öffnungsumfang (J) und der Aufstiegshöhe (h) bei zweigeschossigen Passagen [7]

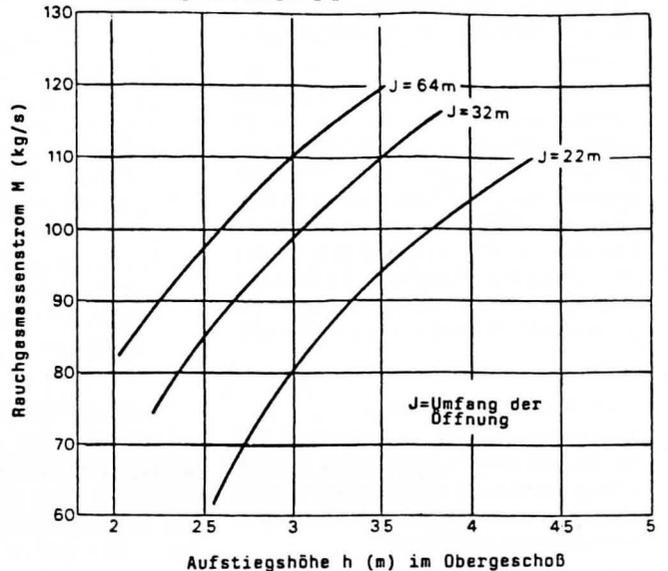
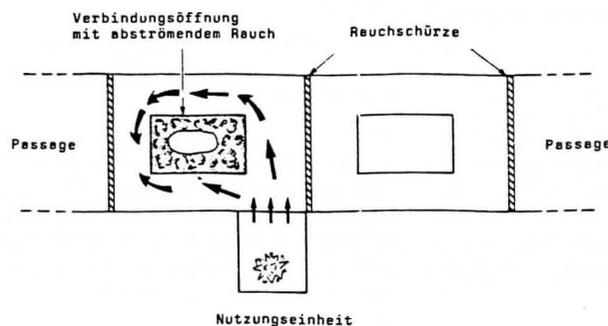


Tabelle 3. Ermittlung der Mindestfläche (m^2) natürlicher Rauchabzüge eines Rauchabschnittes zur Entrauchung einer zweigeschossigen Passage mit Verbindungsöffnungen

Rauchgasmassenstrom M (kg/s)	Deckentemperatur Θ ($^{\circ}C$)	Schichtdicke d_b (m)				
		2	3	4	5	6
60	49	39	32	28	25	23
70	45	48	39	34	30	28
80	43	55	45	39	35	32
90	39	-	52	45	40	37
100	32	-	63	54	49	44
110	28	-	73	63	57	52
120	24	-	-	74	66	60

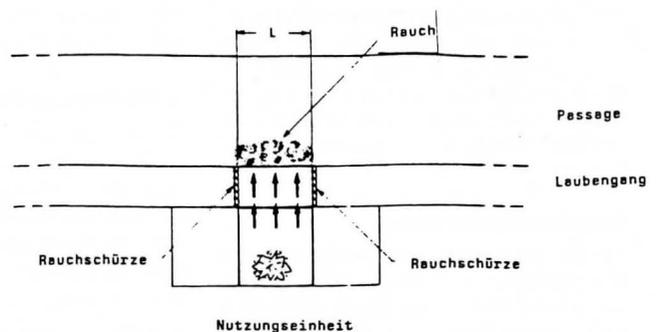
Das Verhältnis der Fläche der Nachströmöffnung zur Fläche der Rauchabzüge muß den Faktor 3 überschreiten.

Abb. 9. Strömungsverhältnisse in zweigeschossigen Passagen mit Verbindungsöffnungen [7]



Grundriß

Abb. 11. Zweigeschossige Passage mit Laubengang [7]



Grundriß

Schnitt siehe Seite 31 oben links

Die Auswertung des Rechenmodells führt zur Abb. 12. Dort wird der abzuführende Rauchgasmassenstrom M in Abhängigkeit von der korrigierten Aufstieghöhe y und dem Abstand L der Rauchschürzen untereinander dargestellt.

Mit diesen Werten können wiederum Mindestleistungen maschineller Rauchabzüge bzw. Mindestflächen natürlicher Rauchabzüge ermittelt werden. Die Werte sind der Tabelle 5 zu entnehmen.

Die Werte der Tabelle 5 sind bei einer Reduzierung der Nachströmöffnung mit den Korrekturfaktoren aus Abb. 8 zu vergrößern.

Bei diesen sehr großen Rauchgasmassenströmen ist zu beachten, daß, bedingt durch die Aufnahme von Umgebungsluft, die Rauchgase so stark heruntergekühlt werden, daß sie ebenfalls einen großen Teil ihres Auftriebes verloren haben. Gleichzeitig wird jedoch deutlich, daß den natürlichen Rauchabzügen Grenzen gesetzt sind und höhere Passagen nur noch maschinell entraucht werden können.

4. Einfluß der Sprinklerung

Bereits eingangs wurde festgestellt, daß der Brand durch die Sprinklerung auf eine Fläche von 3 m x 3 m beschränkt werden muß, denn nur so läßt sich der Rauchgasmassenstrom bewältigen.

Durch die Sprinklerung besteht jedoch die Gefahr, daß der Rauch zu Boden gedrückt und damit die Sicht innerhalb des Rettungsweges eingeschränkt wird. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn der Rauch bereits mehrere Sprinklerreihen durchlaufen hat. Aus diesem Grund muß damit gerechnet werden, daß sich die Rauchuntergrenze bei natürlichen Rauchabzügen wegen der Verminderung des Auftriebs um bis zu 50 % tiefer als rechnerisch ermittelt einstellen wird. Dieses Absinken läßt sich andererseits durch eine pauschale Vergrößerung der Rauchabzüge um 30 % ausgleichen.

Befindet sich in der Passage keine Brandlast, so sollte man dort auf eine Sprinklerung verzichten. Da dies jedoch meistens nicht der Fall ist, sind hier Sprinkler mit höheren Ansprechtemperaturen zu verwenden und gleichzeitig die Fläche natürlicher Rauchabzüge um 30 bis 40 % zu vergrößern. Die direkte Umgebung der Rauchabzüge selbst sollte dabei jedoch von der Sprinklerung ausgenommen werden [7].

5. Auslegungsverfahren

Bei der Auslegung eines Konzeptes zur Entrauchung von Passagen muß zusätzlich zu den genannten Gesichtspunkten eine Abhängigkeit zwischen Mindestdicke der Rauchschieht d_b bei vorgegebenem Massenstrom M und Breite b der Passage beachtet werden, die sich als

Folge strömungstechnischer Gegebenheiten ergibt. Diese Abhängigkeit ist in Tabelle 5 dargestellt.

Als Folge dieser zusätzlichen Abhängigkeit ist bei der Bemessung der Entrauchung ein iteratives Verfahren durchzuführen, da lediglich die geometrischen Randbedingungen der Passagen, die Breite b und die Höhe h , gegeben, jedoch folgende gegensätzliche Abhängigkeiten zu beachten sind:

- Der Rauchgasmassenstrom M ist von der Aufstieghöhe y abhängig, welche der Gleichung

$$M = f(y) = f(h - d_b)$$

folgt. Die Werte dieser Funktion sind für eingeschossige Passagen der Tabelle 1, für zweigeschossige Passagen mit Verbindungsöffnungen der Abb. 10 bzw. für zweigeschossige Passagen mit Laubengängen der Abb. 12 zu entnehmen.

- Die Mindesthöhe des Rauchreservoirs d_b ist andererseits wiederum von Massenstrom M und der Breite der Passage abhängig

$$d_b = f(M, b)$$

und kann der Tabelle 5 entnommen werden.

Als letzter Punkt sind Angaben über die Verteilung der in der Rechnung ermittelten Öffnungsflächen von maschinellen bzw. natürlichen Rauchabzügen in jedem Rauchabschnitt zu machen. Auch diese Überlegung ist von wesentlichem Einfluß auf die Wirkung des Systems, da sich zum einen keine Zonen der Stagnation des Rauches ausbilden dürfen, zum anderen ein übermäßiges Ansteigen der Fläche eines einzelnen Rauchabzuges dazu führt, daß die unterhalb der Rauchzone befindliche klare Luft zusätzlich mitgeführt wird und sich die Bemessungsverhältnisse grundlegend verändern (Abb. 13).

Daher ist der als Ergebnis der Rechnung abzuführende Rauchgasmassenstrom auf die in Tabelle 7 (Seite 32) dargestellte Mindestanzahl von Öffnungen zu verteilen. In dieser Tabelle wird zusätzlich unterschieden, ob sich die Öffnungen im Bereich der Mitte der Passage (1. Zahl) oder im stagnationsgefährdeten Randbereich (2. Zahl) befinden.

6. Berechnungsbeispiele

6.1 eingeschossige Passage

Es soll die Fläche der Rauchabzüge für eine eingeschossige Passage bestimmt werden. Der Brandort ist ein Laden, wobei die größtmögliche Brandfläche durch eine Sprinklerung auf 3 m x 3 m begrenzt wird (Abb. 14).

Die zulässige Dicke der Rauchschieht d_b wird mit 2 m festgelegt, damit Personen sicher unterhalb des Rauches durch die Passage fliehen können.

Die Aufstieghöhe des Rauches y beträgt damit 3,0 m.

Der abzuführende Rauchgasmassenstrom $\Delta M = 25$ (kg/s) kann der Tabelle 1 entnommen werden.

Wählt man einen natürlichen Rauchabzug, wird die Mindestfläche der Rauchabzüge aus Tabelle 2 mit $A_v = 11,5$ m² pro Rauchabschnitt bestimmt. Wegen der Sprinklerung ist diese Fläche um 30 % zu erhöhen. Die endgültige Fläche der Rauchabzüge beträgt damit $A_v = 15$ m². Dabei soll die Fläche des Rauchabschnittes 1000 m² nicht überschreiten. Die Mindestzahl der Öffnungen kann der Tabelle 7 entnommen werden. Danach ist die Mindestfläche auf zwei Öffnungen zu verteilen.

Die Fläche der Nachströmöffnungen muß für einen ausreichenden Wirkungsgrad der Rauchabzüge mindestens 34,5 m² betragen. Alle Annahmen können in Tabelle 6 überprüft werden. Bei einer Breite des Rauchreservoirs von 8 m und einem abzuführenden Rauchgasmassenstrom von 25 kg/s muß die Mindestdicke der Rauchschieht 1,3 m betragen. Die Annahmen sind somit zutreffend.

6.2 zweigeschossige Passage mit Laubengängen

Es soll die Fläche der Rauchabzüge für eine zweigeschossige Passage bestimmt werden. Der Brandort ist ein Laden im Erdgeschoß, wobei die größtmögliche Brandfläche durch eine Sprinklerung auf 3 m x 3 m begrenzt wird (Abb. 15 Seite 32).

Die zulässige Dicke der Rauchschieht d_b wird mit 5 m festgelegt, damit auch Personen aus dem Obergeschoß den Rettungsweg sicher benutzen können.

Für die Aufstieghöhe des Rauches im Obergeschoß gilt:

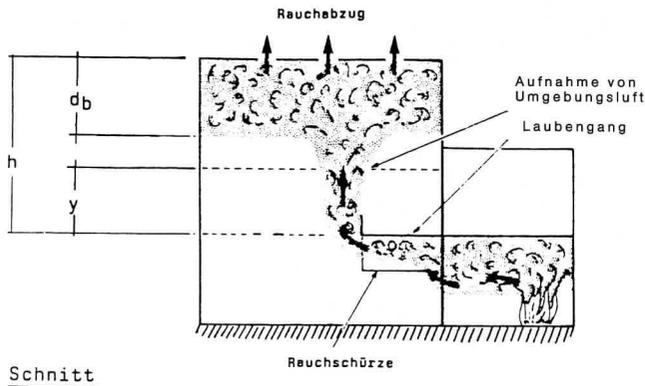
$$\begin{aligned} y_1 &= h - 1,26 d_b \\ &= 8,0 - 1,26 \cdot 5,0 \\ y_1 &= 1,70 \text{ m} \end{aligned}$$

Unterhalb des Laubenganges werden Rauchschürzen nach Tabelle 4 im Abstand $L = 10,0$ m angeordnet, die ggf. erst durch eine Rauchmeldung aktiviert werden.

Aus Abb. 12 kann dann der abzuführende Rauchgasmassenstrom $\Delta M = 125$ kg/s abgelesen werden.

Wählt man einen natürlichen Rauchabzug, wird die Mindestfläche der Rauchabzüge aus Tabelle 5 mit $A_v = 76$ m² pro Rauchabschnitt bestimmt. Wegen der Sprinklerung ist diese Fläche um 30 % zu erhöhen. Die endgültige Fläche der Rauchabzüge beträgt damit $A_v = 90$ m².

Die Mindestzahl der Öffnungen kann wiederum der Tabelle 7 entnommen werden. Danach ist die Mindestfläche auf 2 Öffnungen zu verteilen. Die Fläche der Nach-



Schnitt

Abb. 12. Abhängigkeit des Rauchgasmassenstromes (M) vom Abstand (L) der im Erdgeschoß zweigeschossiger Passagen angeordneten Rauchschürzen [7]

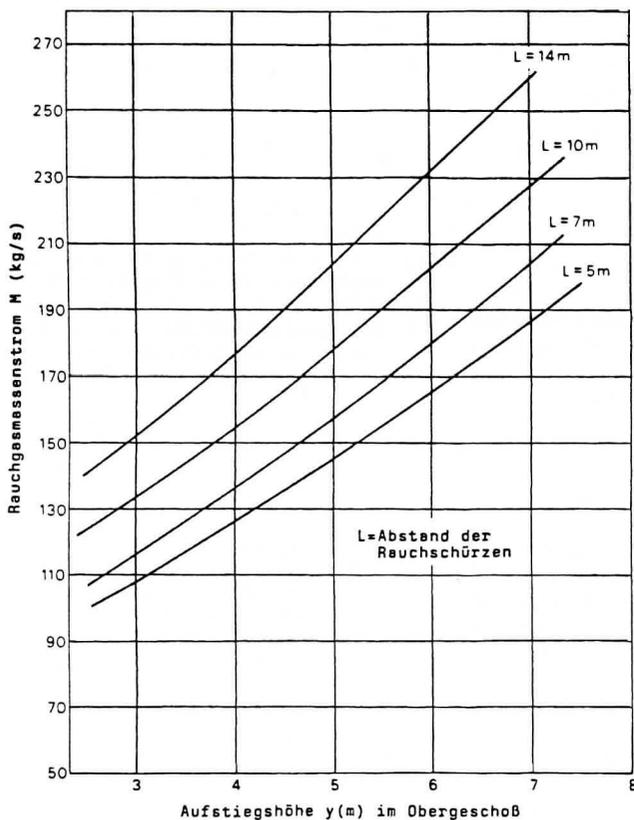
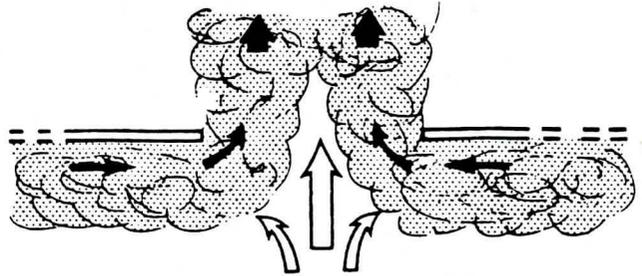


Tabelle 5. Ermittlung der Mindestfläche (m^2) natürlicher Rauchabzüge eines Rauchabschnittes zur Entrauchung einer zweigeschossigen Passage mit Laubengängen

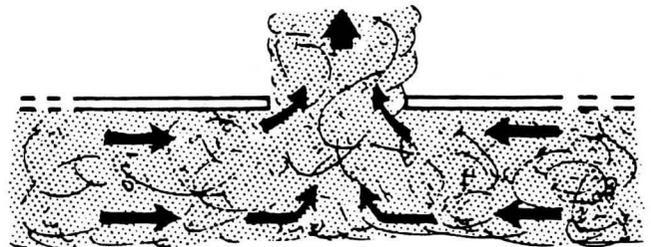
Rauchgasmassenstrom M (kg/s)	Deckentemperatur Θ (°C) [9] (extrapoliert)	Schichtdicke d_b (m)			
		4	5	7	10
110	28	63	57	48	40
130	21	84	76	64	53
150	17	107	96	81	68
170	14	132	118	100	84
190	11	-	148	125	104
210	9	-	-	152	127

Das Verhältnis der Fläche der Nachströmöffnung zur Fläche der Rauchabzüge muß den Faktor 3 überschreiten.

Abb. 13. Problematik übergroßer Rauchabzüge [12]



unzulässige Aufnahme von Luft aus tiefergelegenen Schichten



reguläres Abströmen von Rauch nur aus der Schicht unterhalb der Decke

Abb. 14. Maßangaben zum Berechnungsbeispiel für eine eingeschossige Passage

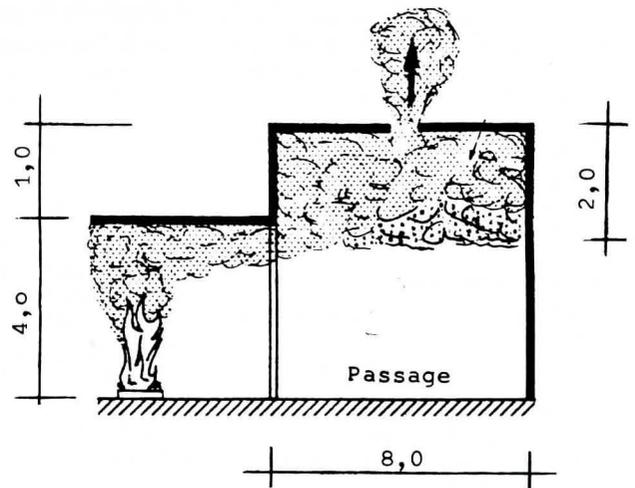


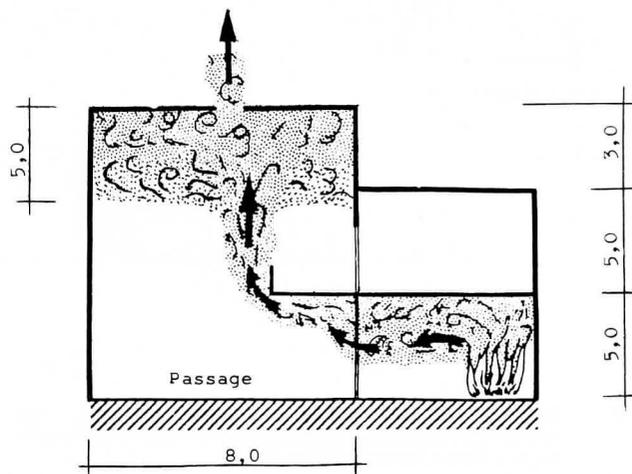
Tabelle 6. Mindestdicke der Rauchsicht d_b (m) als Funktion des abzuführenden Rauchgasmassenstromes M und der Breite des Rauchreservoirs [7]

Rauchgasmassenstrom M (kg/s)	Breite des Rauchreservoirs (m)					
	4	6	8	10	12	15
10	1,1	0,9	0,7	0,6	0,5	0,5
15	1,4	1,1	0,9	0,8	0,7	0,6
20	1,7	1,3	1,1	0,9	0,8	0,7
25	2,0	1,5	1,3	1,1	1,0	0,8
30	2,3	1,7	1,4	1,2	1,1	1,0
40	2,8	2,2	1,8	1,5	1,4	1,2
50	3,4	2,6	2,1	1,8	1,6	1,4
70	4,5	3,4	2,8	2,4	2,2	1,9
90	5,6	4,3	3,5	3,0	2,7	2,3
110	6,7	5,1	4,2	3,6	3,2	2,8
130	7,7	5,9	4,9	4,2	3,7	3,2
150	8,8	6,8	5,6	4,8	4,3	3,7

Tabelle 7. Mindestanzahl der Rauchabzugsöffnungen bei vorgegebener Schichtdicke d_b (m) (1. Zahl: Abzug in der Passagenmitte, 2. Zahl: Abzug in den Randbereichen der Passage) [7]

Rauchgas-massenstrom M (kg/s)	Schichtdicke bis zur Rauchabzugsöffnung d_b (m)							
	1	1,5	2	3	4	5	7	10
9	4- 5	2- 2	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1
12	5- 6	2- 3	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1
15	6- 8	2- 3	1-2	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1
18	7- 9	3- 4	2-2	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1
20	8-10	3- 4	2-2	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1
25	9-13	4- 5	2-3	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1
30	11-16	4- 6	2-3	1-1	1-1	1-1	1-1	1-1
40		6- 8	3-4	1-2	1-1	1-1	1-1	1-1
50		8-11	4-5	2-2	1-1	1-1	1-1	1-1
70			6-8	2-3	1-2	1-1	1-1	1-1
90				3-4	2-2	1-1	1-1	1-1
110				4-5	2-3	1-2	1-1	1-1
130					3-3	2-2	1-1	1-1
150					3-4	2-3	1-1	1-1

Abb. 15. Maßangabe zum Berechnungsbeispiel für eine zweigeschossige Passage



strömöffnungen wird mit mindestens 270 m² festzulegen sein.

Die Annahmen können in Tabelle 6 überprüft werden. Bei einer Breite des Rauchreservoirs von 8 m und einem abzuführenden Rauchgasmassenstrom von 125 kg/s muß die Mindestdicke der Rauchsicht 4,9 m betragen. Die Annahmen sind somit zutreffend.

Ein Vergleich der beiden Rechenbeispiele macht die starke Vergrößerung des abzuführenden Rauchgasmassenstromes beim Übergang von ein- zu zweigeschossigen Passagen deutlich, was sich in einer Vergrößerung der Fläche der Rauchabzüge von 1,5% auf 9% der Grundfläche des Rauchabschnittes ausdrückt.

7. Zusätzliche Hinweise

In [7] werden einige zusätzliche Hinweise zum Betrieb der Rauchabzüge gegeben:

- Alle zum Rauchabzug erforderlichen Einrichtungen sollten nur durch Rauchmelder gesteuert werden. Dies gilt auch für Nachströmöffnungen in Form von Türen in Rettungswegen
- Rauchabzüge, insbesondere mechanische Anlagen, sollten getrennt für jeden Rauchabschnitt geschaltet werden
- Gegebenenfalls sollten auch Rauchabzüge in vom Brandort entfernteren Abschnitten geöffnet werden können, damit diese als Nachströmöffnungen dienen
- Eine Handsteuerung der Rauchabzüge für die Feuerwehr sollte an leicht zugänglicher Stelle vorhanden sein
- Von wesentlicher Bedeutung ist die Tatsache, daß Nachströmöffnungen außerhalb der Rauchzone installiert werden bzw. sich sofort schließen, wenn sie in den Bereich der Rauchzone geraten. Nur so läßt sich eine

Vermischung von Umgebungsluft und Rauch vermeiden und ein unnötiges Anwachsen des entstehenden Rauchgas-Luft-Gemisches vermeiden.

- Die sonstigen bekannten Randbedingungen, um eine sichere Funktion der Rauchabzüge zu gewährleisten, sind selbstverständlich zu beachten.

8. Zusammenfassung

Gerade bei Passagen werden im Brandfall wegen der großen Zahl von Besuchern der unter einem Dach eng zusammenliegenden Nutzungseinheiten besondere Anforderungen an die Sicherheit gestellt werden müssen. Ähnliches gilt auch im Hinblick auf eine Minimierung des Sachschadens.

Nachdem bereits ein Sicherheitskonzept im Hinblick auf die Brandausbreitung vorgelegt wurde [6], ist es erforderlich, auch im Hinblick auf die Rauchaussbreitung Aussagen machen zu können. Dazu wurden die Forschungsergebnisse der Fire Research Station, Borehamwood UK, im Hinblick auf die Rauchaussbreitung in Passagen, zusammengefaßt und vorgestellt. Als wesentliche Randbedingung des gesamten Komplexes der Entrauchung ist zu beachten, daß der Brandumfang durch eine Sprinklerung auf eine Fläche von 3 m x 3 m eingegrenzt wird. Problematisch ist dabei, daß durch die Sprinklerung die Rauchgase abgekühlt werden und einen Teil ihres Auftriebes verlieren. Analog dazu ist das Verhalten von Schwelbränden zu sehen, welche große Mengen Rauch mit geringem Auftrieb freisetzen. Deshalb sind insbesondere bei mehrgeschossigen Passagen mechanische Rauchabzüge den natürlichen Rauchabzügen vorzuziehen. Auch wird durch die Darstellung der gesamten Problematik deutlich, welche ausschlaggebende Bedeutung für die Sicherheit der Nutzer ein zweiter baulicher Rettungsweg hat.

9. Literaturangaben

- [1] Geist, J. F.: Passagen, ein Bautyp des 19. Jahrhunderts, München 1969 S. 12
- [2] FPA Conference: Providing effective protection in shopping precincts, in: Fire Protection 44 (1981) Nr. 527, S. 11
- [3] Kunze, C., Kubiak, W.: Alarmstufe 8, Brand des Tegel-Centers in Berlin, in: Brandschutz 5/1985, S. 166
- [4] Velten, V.: Großfeuer in der Karlsruher Kaiserpassage in: Brandhilfe 6/1985, S. 166
- [5] Hinkley, P. L.: Work by the fire research station on the control of smoke in covered shopping centres, Building Research Establishment Current Paper 83/75, Borehamwood 1975, S. 12
- [6] Kunze, C.: Herleitung des Gebäudeabstandes unter brandschutztechnischen Gesichtspunkten, „schadenprisma“ 4/1987, S. 52
- [7] Morgan, H. P.: Smoke control methods in enclosed shopping complexes of one or more storeys: a design summary, Building Research Establishment Report, 3. Auflage, Garston, Watford 1986
- [8] Thomas, P. H., et/al.: Investigations into the flow of hot gases in roof venting, Fire Research Technical Paper No. 7, London 1963
- [9] Morgan, H. P., Marshall, N. R., Goldstone, B. M.: Smoke hazards in covered multilevel shopping malls: some studies using a model 2-storey mall, Building Research Establishment Current Paper 45/76, Borehamwood 1976 mit Berichtigungsschreiben vom 23. 1. 87 an den Autor
- [10] Morgan, H. P., Marshall, N. R.: Smoke hazards in covered, multilevel shopping malls: Part 1: an experimentally based theory for smoke production, Building research establishment current paper 45/75, Borehamwood 1975
- [11] Morgan, H. P., Marshall, N. R.: Smoke control measures in a covered two-storey shopping mall having balconies as pedestrians walk ways, Building Research Establishment Current Paper 11/79, Borehamwood 1979
- [12] Morgan, H. P., Marshall, N. R.: Smoke hazards in covered, multilevel shopping malls: a method of extracting smoke from each level separately, Building Research Establishment Current Paper 19/78, Borehamwood 1978